木質構造用ねじにおける支圧強度の測定法及び推定手法の提案に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON MEASUREMENT AND CALCULATION METHOD OF EMBEDDING STRENGTH FOR WOOD STRUCTURAL SCREW

荏部泰輝 ——— * 1 青木謙治 ——— * 2
落合 陽 ——— * 3 稲山正弘 ——— * 4

Yasuteru KARUBE ——— * 1 Kenji AOKI ——— * 2
Yo OCHIAI ——— * 3 Masahiro INAYAMA ——— * 4

キーワード：
木造建築, 接合部, EYT 式, 木質構造用ねじ, 支圧強度

Keywords:
Timber structure, Connection, European Yield Theory, Self-tapping screw, Embedding strength

Self-tapping screws are often used in the joints of wooden buildings in Japan. It is useful to use the EYT formula to estimate the shear strength of screw connections. To estimate the shear strength of screw connections, it is necessary to apply the embedding strength to EYT equation, but there is little knowledge on the embedding strength of timber by screws. In this paper, embedding test methods of timber by screws were compared, and then was conducted. Furthermore, the evaluation method of embedding strength based on the results of the test was proposed.

1. はじめに

現代の木造建築物において、釘や木質構造用ねじ（以下、ビス）といった接合具は必要不可欠と言えるほど広く使用されている。木質構造で接合部を設計する際、性能確認は実験によることが大半である。実情に即した分かりやすい方法である一方、コストと時間を要すること、また木造軸組工法住宅の許容応力度設計¹⁾（以下、グレー本）、枠組壁工法建築物構造計算指針²⁾（以下、枠組指針）などの指針等で試験方法の例が紹介されているものの、試験の条件設定などについて実施者に委ねられる部分が多く、木質構造初心者には工学的判断が難しく取り組みにくい方法である。

一方で、接合部の構造性能を推定する計算方法として、接合具の有効径（以下、接合具径）、支圧強度、接合具の材料強度と材厚、接合形式によって決まる変形モードからせん断耐力を計算する、Johansen K W の研究³⁾に基づくヨーロッパ型降伏理論式（以下、EYT 式）や、小林らによるビスの構造性能計算式⁴⁾がある。特に、前者はビス接合部の耐力を推定する簡便かつ理論的な方法として欧州では一般的であるが、日本では構造性能を計算によって推定する方法はそれほど普及していない。

その理由として、1. 適用範囲が限られていること、2. 支圧強度や接合具径の誘導方法が明らかになっていないこと、3. 計算値の精度が低く実験値と計算値の差が大きいこと、などが挙げられる。特に支圧強度の誘導方法に関して、接合具径や木材比重の設定方法の裏付け資料が乏しく、また実験的な回帰式しか提案されていないことや、基規準毎に異なる試験方法が提案されていることが設計者に混乱を招いており、その結果、EYT 式の限定的な適用範囲や計算値の精度の低さといった問題につながっていると考えられる。

そこで本報では、ビスに関する EYT 式の適用範囲の拡大や精度向上のため、様々なビスを用いた場合の支圧強度に関する試験方法毎の差異についての比較、および支圧強度計算式の検証を実施し適用

範囲の検討を行うこと、そしてビスにおける支圧強度の算出方法について最適な手法を提案することを目的とする。

2. 接合具の支圧強度について

2.1 計算による支圧強度の求め方

接合部の構造特性を推定するために支圧強度は重要なパラメータである。接合具の支圧強度は、計算式を利用する場合と、実験から求める場合の2通りがある。計算式による方法について説明すると、日本ではボルト、ドリフトピン、ラグスクリュー、釘、木ねじ（概ね直径 4mm 前後で全長 30mm 前後のビス）について、木質構造設計規準・同解説⁵⁾（以下、木規準）で繊維方向の支圧強度 $F_{e\parallel}$ は式 1、繊維直角方向の支圧強度 $F_{e\perp}$ は式 2 によって与えられている。

$$F_{e\parallel}=60.68 \gamma_0 \quad \dots \quad \text{式 1}$$

$$F_{e\perp}=0.5 F_{e\parallel} \quad \dots \quad \text{式 2}$$

※ここで γ_0 : 木規準で示される木材の基準比重

欧州では Juergen Ehlbeck らの研究⁶⁾や L R J Whale らの研究⁷⁾に基づいた欧州の建築基準 EN-1995-1-1 Eurocode5⁸⁾（以下、EC5）によって繊維方向は式 3、繊維直角方向は式 4 で与えられている。

$$F_{e\parallel}=82(1-0.01 d_{ef}) \gamma_1 \quad \dots \quad \text{式 3}$$

$$F_{e\perp}=F_{e\parallel} / (1.35+0.015 d_{ef}) \quad \dots \quad \text{式 4}$$

※ここで γ_1 : EN338⁹⁾で示される木材の比重、 d_{ef} : 接合具径(mm)

2.2 実験による支圧強度の求め方

日本では支圧強度を求めるための試験方法は木規準によって次のように定められている。試験体形状寸法は 1. ISO10984-2¹⁰⁾、2. 枠組指針による。ここで ISO10984-2 は欧州規格の EN383¹¹⁾とアメリカ規格の ASTM D5764¹²⁾に基づき定められていることから、EN383 あるいは ASTM D5764 と読み替え、それぞれの試験体イメージを図 1、図 2 に示す。また、枠組指針²⁾に示される試験体形状寸法は ASTM D5764 と同様なので同じものとして扱う。このようにして製作され

¹⁾ 東京大学大学院農学生命科学研究科 博士課程・修士（農学）
〒113-8657 東京都文京区弥生 1 丁目 1-1

²⁾ 東京大学大学院農学生命科学研究科 准教授・博士（農学）

³⁾ 東京都市大学建築都市デザイン学部建築学科 講師・博士（農学）

⁴⁾ 東京大学大学院農学生命科学研究科 教授・博士（工学）

¹⁾ Grad. Student, Grad. School of Agric. and Life Sci., The Univ. of Tokyo, M. Agr.

²⁾ Assoc. Prof., Grad. School of Agric. and Life Sci., The Univ. of Tokyo, Dr. Agr.

³⁾ Assist. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Design, Tokyo City Univ., Dr. Agr.

⁴⁾ Prof., Grad. School of Agric. and Life Sci., The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

た試験体に対して、図1の方法で実験する場合は母材を貫通する接合具の両側から、図2の場合は母材上部に配置した接合具を鉛直方向に単調加力し、得られた荷重変位曲線をグレー本¹⁾に準じて完全弾塑性解析し、終局耐力の信頼水準75%における95%下側許容限界値（以下、下限値）を接合具径×試験体厚みで表される投影面積で除して基準支圧強度とする。

なおEN383では図1の接合具を正負繰り返し加力し、最大荷重、あるいは5mm変位時荷重の大きい方の値から、ASTM D5764では図1、あるいは図2の接合具を鉛直方向に単調加力し、最大耐力、あるいは同規格で示される5%オフセット法で得られた値から支圧強度を算出する。以上のように、計算で支圧強度を計算する場合は、木材比重と接合具径の扱い方、実験から求める場合は試験方法と実験結果の評価方法を適切に定めなければならない。

図1 EN383¹⁾による支圧試験 図2 ASTM D5764¹⁾による支圧試験

3. 支圧強度試験

3. 1 試験方法の検討

国内外の基規準で提案されているビスなどダボ型接合具の試験規格はEN383とASTM D5764が挙げられるので、これらに準じて実験データを取得し適切な試験方法を検討することとした。最初にビスの試験方法として単調加力と繰り返し加力のどちらが適しているかの検討を行った。本試験に先行して繰り返し加力試験の検証としてEN383に準拠した1回目のプレテストを行ったところ、以下の課題が見つかった。これらの試験状況を写真1、写真2に示す。

- ・木材を貫通する接合具の両端に加力するので、接合具径と木材厚のバランスが適正でないで接合具が曲げ変形してしまう。
- ・接合具が加力治具と平行になるようにビスを打ち込む必要があるが、木材を貫通する際に木材繊維に沿ってビスが自走して進行しようとするため平行にならない。

このことからASTM D5764の方式で検討を進めることとした。

写真1 EN383に準拠した試験状況

写真2 EN383に準拠した試験の加力治具設置前の試験状況

試験体の製作方法についてEN383、及びASTM D5764では実情に合わせて下穴の有無を決定するとしている。すなわち釘の場合は下穴なし、ボルトの場合は下穴ありとなる。ビスの場合は基本的には下

穴を空けないので下穴無しで2回目のプレテストを行った。2回目のプレテストの試験結果を図3、試験状況を写真3に示す。

図3 ねじ山をめり込ませずに加力した場合の荷重変位関係の例

写真3 ねじ山をめり込ませない試験体

実験から図3のようにねじ山がめり込む一次勾配部分と、ビスの谷部がめり込む二次勾配部分に分かれることが確認された。このように2段階の勾配が存在すると、木規準で示される評価（完全弾塑性解析）を適用できない。そこで、ねじ谷部のめり込みが本来求めるべき支圧強度と考えられることから、最初に接合具を母材上部に配置し、ねじ部のみが木部に埋没するまで初期変位を与え、そこから実験を開始することとし、3回目のプレテストを行った。3回目のプレテスト結果を図4、写真4に示す。

図4 ねじ山をめり込ませてから加力した場合の荷重変位関係の例

写真4 3回目プレテストの試験状況

その結果、一次勾配・二次勾配がなくなり滑らかな荷重変位曲線を得ることができた。図3と図4を比較すると初期剛性に差は出ているものの、耐力に与える影響は無視できる程度と考えられるので、ビスのねじ部をめり込ませる試験では下穴無しでねじ部が埋没するまで初期変位を与える方法を新たに設定した。

プレテストの結果より、本試験は写真4のように母材上部に鋼棒やビスのねじ部を配置し、鋼製加圧板で接合具を単調加力でめり込ませることとした。めり込み量は鋼製加圧板が母材表面に接触する直前までとした。試験体のパラメータは下穴の有無、加力する繊維方向、接合具の種類と加力位置（ビスの軸部／ねじ部、鋼棒）、接合具径とし、各仕様10体ずつとした。試験体の下穴の有無については、接合具を木材上部に設置し、①ねじ山部がめり込むまでの初期変位を与え除荷後に開始する方法（NH）、②実仕様に合わせて下穴を空ける方法（HH）、③初期荷重を与えてねじ山をめり込ませてから除荷せずに開始する方法（IT）、④最大荷重の40%の初期荷重→除荷→実験を開始する方法（IE）の4種類について耐力に差が出るかを確認したが、有意差は見られなかったため、①の方法（NH）を中心に実験を進めることとした。

3. 2 繊維方向支圧強度の検討

3. 2. 1 繊維方向加力試験の仕様

試験体仕様一覧を表1に示した。木材は宮城県産の無等級スギ製

材を特段の指示なく調達し、比重の偏りを軽減するため比重 0.4 以下程度と比重 0.5 以下程度のグループに分け、その上で 1 仕様に対して複数の製材から切り出した。用意したスギ製材の中に特に高比重のものも含まれていたが、2.1 で述べた既往の研究で接合具径が同じ場合、支圧強度は比重と線形関係にあることが示されているので除外する必要はないと判断した。接合具は全体がねじ形状の全ねじビス、軸部とねじ部からなる半ねじビス、鋼棒の 3 種類（写真 5）を用意し、試験名は以下のように定めた。なお、接合具径が 10mm より大きいビスがほぼ流通していないことから、10mm より大きい接合具は鋼棒でデータを取得した。

写真5 上から順に鋼棒、半ねじビス、全ねじビス

写真6 割裂防止処置の様子

試験用木材の寸法は幅 105mm×奥行 105mm×高さ 300mmを基本としたが、接合具径が大きくなると加力途中に木材が割裂破壊するケースが生じたので、その際は当該取得データを破棄し、以降の試験は試験体上部から 50mm 程度の位置に、木材側面から全ねじビスを打ち込み（写真 6）割裂防止処置を施した。なお、処置による耐力の影響がないことを同仕様の処置あり／無しの結果を比較し確認した。

表 1 繊維方向加力の支圧強度試験仕様一覧

■低密度グループ					■高密度グループ				
試験No.	木材比重	下穴	接合具	加力位置	試験No.	木材比重	下穴	接合具	加力位置
SC-NH0-5S	0.39	×	5φねじ	軸部	SC-NH0-4SS	0.48	×	4φ鋼棒	軸部
SC-NH0-4SS	0.41	×	4φ鋼棒	軸部	SC-NH0-6T	0.48	×	6φねじ	ねじ部
SC-NH0-6S	0.39	×	6φねじ	軸部	SC-NH0-5SS	0.49	×	5φ鋼棒	軸部
SC-HH0-6S	0.39	○	6φねじ	軸部	SC-NH0-6SS	0.48	×	6φ鋼棒	軸部
SC-HH0-6T	0.38	○	6φねじ	ねじ部	SC-NH0-8T	0.48	×	8φねじ	ねじ部
SC-IT0-6T	0.39	○	6φねじ	ねじ部	SC-NH0-7SS	0.48	×	7φ鋼棒	軸部
SC-NH0-7S	0.38	×	7φねじ	軸部	SC-NH0-10T	0.48	×	10φねじ	ねじ部
SC-NH0-6SS	0.41	×	6φ鋼棒	軸部	SC-IE0-10T	0.51	○	10φねじ	ねじ部
SC-NH0-8T	0.38	×	8φねじ	ねじ部	SC-IT0-10T	0.51	○	10φねじ	ねじ部
SC-HH0-8T	0.38	○	8φねじ	ねじ部	SC-NH0-8SS	0.49	×	8φ鋼棒	軸部
SC-IT0-8T	0.39	○	8φねじ	ねじ部	SC-NH0-10SS	0.49	×	10φ鋼棒	軸部
SC-NH0-7SS	0.39	×	7φ鋼棒	軸部	SC-NH0-15SS	0.49	×	15φ鋼棒	軸部
SC-HH0-10T	0.38	○	10φねじ	ねじ部	SC-NH0-20SS	0.50	×	20φ鋼棒	軸部
SC-IT0-10T	0.39	○	10φねじ	ねじ部					
SC-NH0-8SS	0.39	×	8φ鋼棒	軸部					
SC-NH0-10SS	0.39	×	10φ鋼棒	軸部					
SC-NH0-15SS	0.39	×	15φ鋼棒	軸部					
SC-NH0-20SS	0.39	×	20φ鋼棒	軸部					

○: 下穴あり, ×: 下穴なし

3. 2. 2 繊維方向加力試験の結果

実験結果を低比重、高比重グループに分けて表 2 に示す。鋼棒、ビスの軸部、ビスのねじ山部、いずれの部分を加力した場合でも、あるいは低比重／高比重グループ間でも、写真 7～写真 10 のように接合具が木材にめり込む過程に相違は見られなかった。また、実験における終局耐力の下限値の変動係数は低比重グループで 0.100、

高比重グループで 0.112 となり、最大耐力の平均値の変動係数は低比重グループで 0.150、高比重グループで 0.138 となった。この結果より低比重グループがややばらつきが少ないと言える。

写真7 鋼棒加力による試験終了時の様子

写真8 鋼棒除去後

写真9 ねじ部加力による試験終了時の様子

写真10 ビス除去後

表 2 繊維方向加力の支圧強度実験結果一覧

■低密度グループ					■高密度グループ				
試験No.	計算値		実験値		試験No.	計算値		実験値	
	木基準式 式1で算出	Eurocode式 式3で算出	P_u 下限値 より算出	P_{max} 平均値 より算出		木基準式 式1で算出	Eurocode式 式3で算出	P_u 下限値 より算出	P_{max} 平均値 より算出
SC-NH0-5S	19.4	29.3	21.7	28.5	SC-NH0-4SS	19.4	36.8	32.7	41.7
SC-NH0-4SS	19.4	29.2	17.7	31.6	SC-NH0-6T	19.4	36.9	38.1	51.5
SC-NH0-6S	19.4	29.2	21.6	28.1	SC-NH0-5SS	19.4	36.4	33.1	40.2
SC-HH0-6S	19.4	29.2	23.5	29.2	SC-NH0-6SS	19.4	36.0	30.2	36.6
SC-HH0-6T	19.4	29.4	23.6	43.2	SC-NH0-8T	19.4	36.1	33.2	43.0
SC-IT0-6T	19.4	29.4	24.9	43.1	SC-NH0-7SS	19.4	35.6	30.9	38.8
SC-NH0-7S	19.4	28.9	22.2	28.8	SC-NH0-10T	19.4	35.5	30.8	38.4
SC-NH0-6SS	19.4	28.6	19.9	30.3	SC-IE0-10T	19.4	35.5	31.8	40.8
SC-NH0-8T	19.4	28.7	24.8	33.5	SC-IT0-10T	19.4	35.5	28.4	36.9
SC-HH0-8T	19.4	28.7	22.0	32.9	SC-NH0-8SS	19.4	35.2	27.6	34.5
SC-IT0-8T	19.4	28.7	23.5	34.2	SC-NH0-10SS	19.4	34.5	28.8	34.4
SC-NH0-7SS	19.4	28.3	24.6	35.1	SC-NH0-15SS	19.4	32.5	26.4	33.1
SC-HH0-10T	19.4	28.2	24.9	30.9	SC-NH0-20SS	19.4	30.6	25.1	30.7
SC-IT0-10T	19.4	28.2	23.8	33.2					
SC-NH0-8SS	19.4	28.0	24.8	32.9					
SC-NH0-10SS	19.4	27.4	19.2	29.0					
SC-NH0-15SS	19.4	25.9	19.2	26.1					
SC-NH0-20SS	19.4	24.4	21.6	26.5					

3. 2. 3 繊維方向加力試験結果の考察

次に実験結果の評価方法について検討を行った。実験結果から支圧強度を算出する方法は、基規準では表 3－①のように終局耐力の下限值（以下、 P_u 下限値）を投影面積で除し支圧強度とするものと、表 3－②のように最大耐力の平均値（以下、 P_{max} 平均値）を投影面積で除し支圧強度とするものの 2 通りが示されている。

表 3 支圧強度実験結果の評価方法

規格・基準	算出に用いる耐力	概要
① 枠組壁工法建築物構造計算指針	終局耐力	完全弾塑性解析によって終局荷重 P_u を求め、接合具径と試験体厚み(投影面積)で除し、5%下限値を支圧強度とする。
② ASTM D5764-97a	最大耐力、または 5%オフセット値	最大荷重、または第一剛性直線を接合具直径の5%平行移動し、荷重-変位曲線との交点の値を投影面積で除して支圧強度とする。
	EN383	最大耐力、または 5mm変位時の荷重を求め、接合具径と試験体厚み(投影面積)で除して支圧強度とする。

なお、投影面積を算出する際の接合具径は、表 3－①の場合は木

規準に示されるビスの呼び径（ねじ外径）の0.75倍、表3-②の場合はEC5に示されるビスの谷径の1.1倍とした。この2通りで算出した支圧強度の、それぞれの回帰式、式1と式3を加えたものの低比重グループを図5、高比重グループを図6に示す。なお、式1に用いる木材比重は木規準に準じて0.32（スギ：J3）、式3に用いる木材比重は仕様毎の実測値の下限值 γ_d （低比重グループは0.37、高比重グループは0.47）とした。

図5より繊維方向加力試験の P_{max} の平均値を接合具の投影面積で除した支圧強度の回帰直線（以下、 P_{max} 平均値 $\parallel$ 回帰式）は、全ての接合具径において式3を上回っているが、接合具径が大きい範囲では同程度に評価されることが確認できた。繊維方向加力試験の P_u 下限値を投影面積で除した支圧強度の回帰直線（以下、 P_u 下限値 $\parallel$ 回帰式）は、全ての接合具径において式1を上回っているが、接合具径が大きい範囲では同程度に評価されることが確認できた。

図6より、接合具径が15mm以下程度の場合では P_{max} 平均値 $\parallel$ 回帰式が式3を上回ることが確認できた。 P_u 下限値 $\parallel$ 回帰式は、全ての接合具径で式1を上回っていることが確認できた。木規準では式3の接合具径を安全側である26mmに固定し、比重を樹種グループ毎の基準比重とする式1が示されているが、高比重グループにおいて接合具径が小さい場合に、式1は回帰式の1/2程度になり、極端に安全側となっている。

図5 繊維方向支圧強度と接合具径の関係（低比重グループ）

図6 繊維方向支圧強度と接合具径の関係（高比重グループ）

3. 3 繊維直角方向支圧強度の検討

3. 3. 1 繊維直角方向加力試験の仕様と結果

試験で用いる木材は繊維方向加力試験と同様に比重の偏りが生じないように用意し、試験体仕様一覧を表4に示した。実験結果は低比重、高比重グループに分けて表5に示す。鋼棒、ビスの軸部、ビスのねじ山部、いずれの部分を加力した場合でも、あるいは低比重／高比重グループ間でも、写真11～写真14のように接合具が木材にめり込む過程に相違は見られなかった。また、実験における終局耐力の下限値の変動係数は低比重グループで0.155、高比重グループで0.139となり、最大耐力の平均値の変動係数は低比重グループで0.121、高比重グループで0.156となった。この結果より両グループ間でばらつきはほぼ同じと言える。試験用木材の寸法は幅200mm×奥行105mm×高さ105mmを基本としたが、接合具径が大きくなると加力途中に木材表面が写真11のように持ち上がるケースが生じた。その際は当該データを破棄し、以降の試験は木材幅を300mm程度に大きくする、あるいは木材表面を万力で押さえ付けるなどの処置を行った。なお、処置による耐力の影響がないことを同仕様の処置あり／無しの結果を比較し確認した。

表4 繊維直角方向加力の支圧強度試験仕様一覧

■低密度グループ					■高密度グループ				
試験No.	木材比重	下穴	接合具	加力位置	試験No.	木材比重	下穴	接合具	加力位置
SC-NH90-5S	0.39	×	5φねじ	軸部	SC-NH90-4SS	0.50	×	4φ鋼棒	軸部
SC-NH90-4SS	0.39	×	4φ鋼棒	軸部	SC-NH90-6T	0.50	×	6φねじ	ねじ部
SC-HH90-6T	0.38	○	6φねじ	ねじ部	SC-NH90-5SS	0.49	×	5φ鋼棒	軸部
SC-NH90-6S	0.39	×	6φねじ	軸部	SC-NH90-6SS	0.50	×	6φ鋼棒	軸部
SC-HH90-6S	0.39	○	6φねじ	軸部	SC-NH90-8T	0.52	×	8φねじ	ねじ部
SC-IT90-6T	0.39	○	6φねじ	ねじ部	SC-NH90-7SS	0.50	×	7φ鋼棒	軸部
SC-NH90-7S	0.39	×	7φねじ	軸部	SC-NH90-10T	0.48	×	10φねじ	ねじ部
SC-NH90-6SS	0.39	×	6φ鋼棒	軸部	SC-IE90-10T	0.51	○	10φねじ	ねじ部
SC-NH90-8T	0.38	×	8φねじ	ねじ部	SC-IT90-10T	0.51	○	10φねじ	ねじ部
SC-HH90-8T	0.37	○	8φねじ	ねじ部	SC-NH90-8SS	0.50	×	8φ鋼棒	軸部
SC-IT90-8T	0.39	○	8φねじ	ねじ部	SC-NH90-10SS	0.51	×	10φ鋼棒	軸部
SC-NH90-7SS	0.39	×	7φ鋼棒	軸部	SC-NH90-15SS	0.50	×	15φ鋼棒	軸部
SC-HH90-10T	0.38	○	10φねじ	ねじ部	SC-NH90-20SS	0.51	×	20φ鋼棒	軸部
SC-IT90-10T	0.39	○	10φねじ	ねじ部					
SC-NH90-8SS	0.40	×	8φ鋼棒	軸部					
SC-NH90-10SS	0.40	×	10φ鋼棒	軸部					
SC-NH90-15SS	0.41	×	15φ鋼棒	軸部					
SC-NH90-20SS	0.41	×	20φ鋼棒	軸部					

○：下穴あり、×：下穴なし

写真11 鋼棒加力による試験終了時の様子

写真12 鋼棒除去後

写真13 ねじ部加力による試験終了時の様子

写真14 ビス除去後

表 5 繊維直角方向加力の支圧強度実験結果一覧

■低比重グループ					■高比重グループ				
試験No.	計算値		実験値		試験No.	計算値		実験値	
	木基準式 式2で算出	Eurocode5 式4で算出	P_u 下限値 より算出	P_{max} 平均値 より算出		木基準式 式2で算出	Eurocode5 式4で算出	P_u 下限値 より算出	P_{max} 平均値 より算出
SC-NH90-5S	9.7	20.8	20.2	26.1	SC-NH90-4SS	9.7	28.0	21.2	37.6
SC-NH90-4SS	9.7	20.6	17.9	27.2	SC-NH90-6T	9.7	28.3	26.7	52.4
SC-NH90-6S	9.7	20.6	16.9	27.9	SC-NH90-5SS	9.7	27.4	20.1	36.6
SC-HH90-6S	9.7	20.6	14.5	20.6	SC-NH90-6SS	9.7	26.9	19.9	36.9
SC-HH90-6T	9.7	20.9	14.7	26.0	SC-NH90-8T	9.7	27.0	26.1	41.3
SC-IT90-6T	9.7	20.9	16.8	30.9	SC-NH90-7SS	9.7	26.3	22.3	32.4
SC-NH90-7S	9.7	20.2	15.2	26.4	SC-NH90-10T	9.7	26.1	23.7	37.7
SC-NH90-6SS	9.7	19.8	18.6	27.1	SC-IE90-10T	9.7	26.1	26.8	41.7
SC-NH90-8T	9.7	19.9	18.5	27.6	SC-IT90-10T	9.7	26.1	26.3	38.9
SC-HH90-8T	9.7	19.9	12.8	20.6	SC-NH90-8SS	9.7	25.8	20.6	34.3
SC-IT90-8T	9.7	19.9	16.1	26.1	SC-NH90-10SS	9.7	24.7	20.1	32.2
SC-NH90-7SS	9.7	19.4	16.7	25.8	SC-NH90-15SS	9.7	22.2	21.2	30.2
SC-HH90-10T	9.7	19.2	13.2	20.3	SC-NH90-20SS	9.7	19.9	17.3	31.8
SC-IT90-10T	9.7	19.2	14.7	26.3					
SC-NH90-8SS	9.7	19.0	18.3	24.9					
SC-NH90-10SS	9.7	18.2	16.5	24.1					
SC-NH90-15SS	9.7	16.4	11.2	21.7					
SC-NH90-20SS	9.7	14.7	12.3	21.0					

3. 3. 2 繊維直角方向加力試験の考察

繊維方向加力試験と同様に表3に準じた結果の評価を行い、それぞれの回帰直線、式2と式4を加えたものの低比重グループを図7、高比重グループを図8に示す。なお、式2を用いる木材比重は木規準に準じて0.32（スギ：J3）、式4に用いる木材比重は仕様毎の実測値の下限値 γ_2 （低比重グループは0.37、高比重グループは0.50）とした。なお、投影面積を算出する際の接合具径は、表3-①の場合は木規準に示されるビスの呼び径（ねじ外径）の0.75倍、表3-②の場合はEC5に示されるビスの谷径の1.1倍とした。

図 7 繊維直角方向支圧強度と接合具径の関係（低比重グループ）

図7より、繊維直角方向加力試験の P_{max} の平均値を投影面積で除した支圧強度の回帰直線（以下、 P_{max} 平均値 $\perp$ 回帰式）は、全ての接合具径において式4を20%程度上回っていることが確認できた。繊維直角方向加力試験の P_u 下限値を投影面積で除した支圧強度の回帰直線（以下、 P_u 下限値 $\perp$ 回帰式）は、式2より全般的に高いが、接合具径が大きくなると、その差が小さくなることが確認できた。

図8より、 P_{max} 平均値 $\perp$ 回帰式と式4は概ね線形関係にあり、かつ全ての接合具径において回帰式が式4を30%程度上回っている。 P_u 下限値 $\perp$ 回帰式は、全ての接合具径で式2を2~2.5倍程度上回っていることが確認できた。繊維方向加力試験と同様、式2は大幅に安

全側に計算されていると考えられ、特に高比重グループにおいては、その差が顕著である。

図 8 繊維直角方向支圧強度と接合具径の関係（高比重グループ）

4. 導出された支圧強度の妥当性検証

4. 1 繊維方向支圧強度の妥当性検証

Johansen K W の研究³⁾に基づく接合部の構造性能を推定する EYT 式は、木材と接合具が双方とも、あるいはどちらか一方が塑性化した状態で成立する接合部の変形モードごとに計算式が定められている。従って支圧強度も木材が塑性化した状態から導出されることが望ましい。図3、図4より、荷重が P_{max} に達した以降一定になっていることから、 P_{max} 時点で木材は塑性化していると考えられる。また支圧強度試験では、節や木目など木材表層状態による変動が大きい傾向にあり、接合部に多数本用いられるビスの場合、下限値で評価すると極端に安全側になる可能性がある。そこで、 P_{max} 平均値 $\parallel$ 回帰式を基準として、 P_u 下限値 $\parallel$ 回帰式、木規準⁵⁾で示される式1、EC5⁸⁾で示される式3とを比較し妥当性を検討した。

図5、図6より、 P_{max} 平均値 $\parallel$ 回帰式に対して、式3は傾きがやや異なるが、接合具径が15mm程度以下の範囲においては概ね15%以内程度安全側になっている。なお、図5、図6には示していないが、 P_{max} 下限値の回帰式に対して、式3は10~30%程度危険側となった。同様に P_{max} 平均値 $\parallel$ 回帰式に対して P_u 下限値 $\parallel$ 回帰式、式1は大幅に安全側になっている。一般的に計算式は実験結果のやや安全側であることが望ましいこと、かつ式3が欧州などで相応の実績あることを勘案すると、 P_{max} 平均値 $\parallel$ 回帰式はスギに対するビスの支圧強度実験結果の評価として概ね妥当と考えられる。

次に、繊維方向支圧強度 $F_{e\parallel}$ の実験式について検討した。実験式はJuergen EhlbeckらやLRJ Whaleらの研究^{6), 7)}によるもの（式3）や、澤田らの研究¹³⁾によるもの（式5）が提案されている。 $F_{e\parallel} = 90.7(1 - 0.00653d_{ef})\gamma_0 \dots \dots \dots$ 式5

これらでは、 $F_{e\parallel}$ が接合具径と木材比重の関数となることが示されており、本研究の接合具径が大きくなると $F_{e\parallel}$ が低くなり、木材比重が高くなると $F_{e\parallel}$ が高くなる結果と合致している。このことを鑑み、 $F_{e\parallel}$ の算定式を $a \times (1 - b \times d_{ef}) \times \gamma_2$ と表せるものとし、低比重グループと高比重グループ、それぞれから得られた P_{max} 平均値 $\parallel$ 回帰式に近似し、かつ回帰式より安全側の評価となるようにaとb

を定めたものが式6である。

$$F_{e\parallel}=97(1-0.02d_{ef})\gamma_o \quad \dots \quad \text{式6}$$

参考として、接合具径が6mmの場合について、既往研究の式3、式5、本報提案の式6の比較を図9に示す。

図9 繊維方向の支圧強度計算式の比較 (d_{ef} =6mm の場合)

4. 2 繊維直角方向支圧強度の妥当性検証

繊維並行方向支圧強度の妥当性検証と同様に、 P_{max} 平均値 $\perp$ 回帰式を基準として、 P_u 下限値 $\perp$ 回帰式、本規準で示される式2、EC5で示される式4、とを比較し妥当性を検討した。

図7、図8より、 P_{max} 平均値 $\perp$ 回帰式に対して、式4は傾きが同程度で、全ての接合具径においては概ね20～30%以内程度安全側になっている。なお、図7、図8には示していないが、 P_{max} 下限値の回帰式に対して、式4はほぼ同程度となった。同様に P_{max} 平均値 $\perp$ 回帰式と P_u 下限値 $\perp$ 回帰式、式2を比較すると大幅に安全側になっている。一般的に計算式は実験結果のやや安全側であることが望ましいこと、式4が欧州などで相応の実績あることを勘案すると、 P_{max} 平均値 $\perp$ 回帰式はスギに対するビスの支圧強度実験結果の評価として概ね妥当と考えられる。

次に、繊維直角方向支圧強度の実験式について検討した。実験式は、Juergen Ehlbeck らの研究や L R J Whale らの研究による式4、澤田らの研究による式7が提案されている。

$$F_{e\perp}=67.6(1-0.0219d_{ef})\gamma_o \quad \dots \quad \text{式7}$$

式2と式4で、接合具径が同じ場合、繊維直角方向支圧強度は繊維方向支圧強度と線形関係にあることが示されており、本研究でも図5と図7、図6と図8から両者が概ね線形関係にあることと合致している。これらを鑑み、本報では $F_{e\perp}$ の算定式を $F_{e\parallel}/(c-d\times d_{ef})$ と表せるものとし、低比重グループと高比重グループ、それぞれから得られた P_{max} 平均値 $\perp$ 回帰式に近似し、かつ回帰式より安全側の評価となるように c と d を定めたものが式8である。

$$F_{e\perp}=F_{e\parallel}/(1.33-0.01d_{ef}) \quad \dots \quad \text{式8}$$

図10 繊維直角方向の支圧強度計算式の比較 (d_{ef} =6mm の場合)

5. まとめ

本研究からスギ製材に対するビスの支圧強度を求める試験方法、及び強度推定手法について、以下の知見が導き出せる。

1. 実験による支圧強度の求め方

実験は母材上部に接合具を配置し鋼製の加圧板によって接合具を鉛直方向に加力する。加力は単調加力で加圧板が母材に接するまで変位させる。得られた最大耐力の平均値を投影面積で除したものを支圧強度とする。

2. 計算による支圧強度の求め方

繊維方向の支圧強度 $F_{e\parallel}$ は式6、繊維直角方向の支圧強度 $F_{e\perp}$ は式8で表すことが出来る。

$$F_{e\parallel}=97(1-0.02d_{ef})\gamma_o \quad \dots \quad \text{式6}$$

$$F_{e\perp}=F_{e\parallel}/(1.33-0.01d_{ef}) \quad \dots \quad \text{式8}$$

※ここで、 d_{ef} : ビス谷径の1.1倍、あるいはビスの軸径、 γ_o : 木材比重

ただし、適用範囲はスギ製材のみ、かつ接合具径は3.8mm～15mmである。

最後に、研究に際し多大な御協力を頂いた関係各位に心から謝意を表します。

参考文献

- 公益財団法人 日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2017年版）、2017.3
- 一般社団法人 日本ツーバイフォー建築協会：枠組壁工法建築物構造計算指針、2018.11
- Johansen K W: Theory of Timber Connections, International Association of Bridge and Structural Engineering, Publication No. 9, Bern, Switzerland, pp. 249-262, 1949.9
- Kobayashi, K. and Inayama, M. and Ando, N.: New Estimation Method on Stiffness and Strength of Single-Shear Screw Joints with Structural Panels, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.622, pp. 121-128, 2007.12 (In Japanese)
- 小林研治、稲山正弘、安藤直人：構造用面材を側材に用いたビス接合部における一面せん断剛性・耐力推定式の提案，日本建築学会構造系論文集，622号，pp. 121-128, 2007.12
- 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説、2006.12
- Juergen Ehlbeck, and Hartmut Werner: Softwood and Hardwood Embedding Strength for Dowel-type Fasteners, Proceedings of CIB-W18 Timber Structures, Meeting 25, Paper 25 - 7 - 2, Ahus, Sweden, 1992.8
- L R J Whale and I Smith and H J Larsen: Design of Nailed and Bolted Joints Proposals for The Revision of Existing Formula, Proceedings of CIB-W18 Timber Structures, Meeting 25, Paper 20 - 7 - 1, Ahus, Sweden, 1992.8
- EN1995-1-1: Eurocode5 Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, 2004.12
- EN338: Structural timber - Strength classes, 2009.10
- ISO10984-2: Timber structures - Dowel-type fasteners - Part 2: Determination of embedding strength, 2009.8
- EN383: Timber Structures - Test methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners, 2007.2
- ASTM D5764: Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-Based Products, 2013.4
- Sawata, K. and Yasumura, M.: Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners, J Wood Sci. 48, pp138-146, 2002.4

[2020年10月7日原稿受理 2020年12月9日採用決定]